

一种民机 PHM 顶层架构仿真验证平台的设计和研发

周长红, 黄建民, 郑良义

(中航工业集团上海航空测控技术研究所 故障诊断与健康健康管理技术航空科技重点实验室, 上海 201601)

摘要: 由于民机故障预测与健康管理系统可提高飞机安全性、增强机队管理、降低维修费用等功能, 航空部门愈发重视 PHM 技术发展, 但由于国内民机发展较晚, 民机 PHM 顶层架构技术研究尚处探索中, 文中结合国内外民机 PHM 发展情况, 借鉴国外先进机型的 PHM 设计方法, 提出适合我国民机 PHM 顶层架构研制的仿真方法和设计思路, 然后按照评判准则进行架构验证, 为民机 PHM 发展提供一定技术支持。

关键词: PHM 体系结构; 健康管理; 仿真; 验证

Design and Research of PHM Top-level Architecture Simulation and Verification Platform For Civil Aircraft

Zhou Changhong, Huang Jianmin, Zheng Liangyi

(AVIC Shanghai Aero Measurement & Control Technology Research Institute, Shanghai 201601, China)

Abstract: Because of the civil aircraft fault prediction and health management (PHM) system can improve the aircraft safety, enhance the fleet management, to reduce the maintenance cost and etc, the aviation sector increasingly attach more importance to PHM technology development, but due to the domestic commercial development of late, the top commercial PHM architecture technology research is still in exploration, combining with domestic and foreign civil aircraft PHM development situation, draw lessons from foreign advanced type of PHM design method, put forward suitable for China's commercial PHM top-level architecture developed simulation method and the design train of thought, and then verifies the architecture according to the evaluation criterion, provide a certain technical support for the civil aircraft PHM.

Keywords: PHM architecture; health management; simulation; verification

0 引言

在民用航空领域中, 大型客机实时健康监控一般是通过机载设备来实现, 飞机通过自身的监控设备对飞机健康状况进行实时监测, 如地面人员不能及时得到飞行故障信息, 对于飞行中特殊情况的应急处理无法操作, 严重影响飞行的安全性和资源的操控性。

为飞机订制一套合理可行的健康管理系统, 使航空公司的飞机维修和资源管理更全面、更完善, 不仅能提高飞机的安全性、环保性, 还可控制燃油成本、节约资源, 是现代飞机发展中的重要内容和迫切需求。然而面对民机不同架构的 PHM 系统, 需要选择合适的评判准则来验证, 所以首要问题是选择合适的仿真软件和设备来搭建仿真验证平台。

文中基于燃油系统和客舱系统开发的一套民机 PHM 顶层架构的仿真验证平台, 提出民机不同 PHM 架构, 配置不同的机载系统和监控参数, 实现地面对机载数据的实时监

控, 地面完成故障诊断与健康健康管理, 然后根据评判准则(费效性和功能完整性)进行 PHM 架构验证, 评判架构是否具有合理性和可行性。

1 国内外在民机 PHM 系统上的发展

1.1 国外民机 PHM 技术发展

20 世纪 90 年代初期, 国外在飞行数据采集记录系统的基础上, 引入飞机故障预测与健康管理的概念和技术。经过 20 多年的发展, 已实现具备空地一体化、飞机实时诊断等特点的飞机维护支持系统。美国、欧洲的主要航空发达国家十分重视 PHM 的研究与应用, PHM 技术正朝着更加综合化、信息化、标准化和智能化的方向发展^[1]。

目前在国外已开发了相关 PHM 设计软件, 进行 PHM 的辅助设计和仿真分析, 主要以下 3 种:

1) PHM DesignTM: PHM DesignTM 是由 Impact-tec 公司开发的一种创新的软件工具, 专门致力于设计, 开发、评估和部署预测和健康管理系统 (PHM) 或基于状态的维修 (CBM) 系统。PHM 的设计模型是构造系统级设计布使用传感器、算法 (BIT, 诊断和预测后)、失效模式、症状影响和维护任务, 充分表现 PHM 系统的功能。

2) MADe PHM: MADe PHM 是 PHMTechnology 提

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2018-12-27。

作者简介: 周长红(1979-)女, 江苏徐州人, 硕士, 高工, 主要从事数据采集与处理方向的研究。

供的一款 PHM 辅助设计工具,用于工程师执行或分析 CBM、HUMS、诊断、健康管理和 PHM 对于任务和安全关键系统的功能、作用。使用 MADe 的系统模型和故障数据, MADe PHM 能使用户为新的或遗留系统相结合传感器集进行设计,比较每种设计下的财政和工程参数(如:费用、可靠性等)。

3) 波音 IVHM 技术的发展:波音公司预研部门开发的 IVHM 技术可转化为应用到实际飞行中的成熟产品,其产品的重点是在于系统集成与信息集成^[2]。为实现这一目标,“鬼怪”工作室开发一个健康管理工程环境,包括项目分析与建模环境、开发环境和使用环境,这 3 个设计环境为波音公司 IVHM 项目开发提供了一组过程与工具,促进集成与完善 IVHM 所必需的各项关键技术。

1.2 国内在民机 PHM 系统上的发展

国内自“十二五”以来,在飞机 PHM 领域已经开展广泛的研究,如飞机故障预测和健康管理系统(PHMS)、直升机健康与使用监测系统(HUMS)、远程故障诊断系统等,并在状态监测、故障诊断技术研究等领域有了较大突破。

由于国内民机发展比较晚,C919 大飞机目前处于研制试飞阶段,民航相关部门认识到研制民机 PHM 系统的重要性和紧迫性,组织国内专家进行 PHM 的评估和验证工作。

代京等人详细描述 NASA 的 AHMS 的验证与评估测试环境和评估指标体系^[3],Impact 公司的 PHM 验证与评估虚拟测试台、验证与评估数据源和验证与评估指标体系,波音公司的健康管理工程环境的项目分析与建模环境、开发环境、操作运行环境等国外研究情况,并针对国内的开展 PHM 验证与评价研究的提出了一些重要的建议。

马宁等人针对机电液压系统构建了 PHM 仿真验证框架结构^[4],对基于混沌神经网络的故障检测方法等关键技术展开研究,最后利用液压泵壳体的虚拟仿真信号对算法进行了验证。

吴明强等人分析了国内外飞行器故障预测与健康管理集成工程环境研究^[5],提出了构建 PHM 的通用化支撑平台和验证环境的设计思路,详细阐述了 PHM 开发环境、运行环境和验证环境等功能模块。

王志鹏等人提出了基于仿真试验验证技术的 PHM 演示验证平台的设计方法^[6]、PHM 系统评价技术和平台架构,用于对 PHM 产品的性能评价。

樊旭斌对国内外 PHM 系统结构进行了调研分析^[7],对通用 PHM 功能结构进行了基于 UML 的建模,建立不同功能层的惊天数据模型,最后使用 LabVIEW 和 MATLAB 建模技术对旋转接卸转子的相关故障进行了模拟和验证。

杨洲、景博等人从设计过程的角度分析了 PHM 验证与评价中的不足^[8],并详细阐述的 3 种验证模式,包括基于分析评估的方法、基于仿真(全系统仿真和半实物仿真)的方法和基于试验的方法,最后对现有性能评价指标进行了分类,给出了相应的使用范围。并指出这 3 种方法只有相

互补充、相互验证,才能构成完善的验证体系,确保 AHMS 的设计功能得以完全实现。

马小骏等人介绍了 C919 大型客机的健康管理系统的总体架构,划分了功能模块,分析了实现该系统的实时地面实时监控技术、趋势分析及预测方法、剩余寿命预测方法、故障诊断算法、维修决策方法以及系统研制仿真技术等 6 个关键技术和方法,并搭建了半物理仿真平台^[9],验证系统的功能。

1.3 民机 PHM 顶层架构的仿真需求

民机 PHM 系统涉及范围广泛,包括机载、地面、航空公司、通信、客服等方面,顶层架构仿真需要集成机载各子系统的功能^[10],根据民机 PHM 系统的特点,从使用、功能的角度进行划分,民机 PHM 系统可分为 5 个部分:

- 1) 机上 PHM 系统;
- 2) 空地数据通信系统;
- 3) 地面健康管理平台;
- 4) 航空公司的地面运营管理系统;
- 5) 地面健康管理平台/航空公司的地面运营管理系统一使用状态实时监控平台的网络通信系统。

2 民机 PHM 顶层架构仿真验证设计过程

2.1 民机 PHM 顶层架构的仿真系统组成

仿真验证平台由 4 台仿真计算机和 1 台打印机组成,4 台仿真计算机包括机载 PHM 仿真系统、地面健康管理仿真系统、配置管理系统及验证仿真系统。机载 PHM 仿真系统主要包括仿真任务驱动系统、数据分析、维护模块以及通讯模块;地面 PHM 仿真系统包括实时监控模块、数据分析模块、故障诊断、健康评估、机队管理模块等;配置管理计算机用于 PHM 顶层架构选择、机载子系统选择,故障类型选择等模块;验证仿真系统完成 PHM 顶层架构评估验证模块。仿真系统中各设备通过以太网和无线 WIFI 方式进行连接。

民机 PHM 仿真验证系统的设计流程如图 1 所示。

2.2 机载 PHM 仿真系统软件设计

机载 PHM 仿真系统采用 LabView 和 Matlab 两款软件作为主要开发工具,LabView 用于界面的显示以及各层静态数据模型的搭建,Matlab 用于算法,并集成到 LabView 搭建的机载仿真框架中。

图 2 为机载 PHM 系统功能架构图,外部的 CMC/IMA 配置管理系统发送启动指令使主程序框架内的各个功能模块开始运行,将航班配置和故障类型信息传入空地通信模块。在主程序运行的过程中,飞行状态监控模块通过读取飞行仿真数据实时地显示飞行参数。同时,空地通信模块每隔一秒钟就给地面 PHM 系统发送事件 & 监控 & 故障报文。如果出现故障,故障告警模块根据空地通信模块发送的故障码显示不同的故障类型。

机载子系统选择燃油系统和客舱系统为例进行仿真设计,图 3 为机载子系统一多功能告警显示器的仿真界面,仿真界面完成飞行信息显示和告警信息显示两个功能,飞

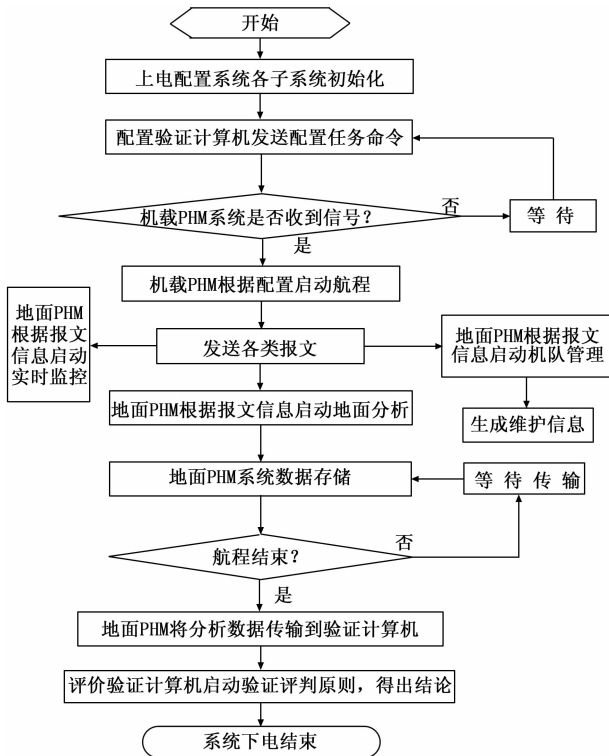


图 1 民机 PHM 顶层架构仿真验证平台设计流程图

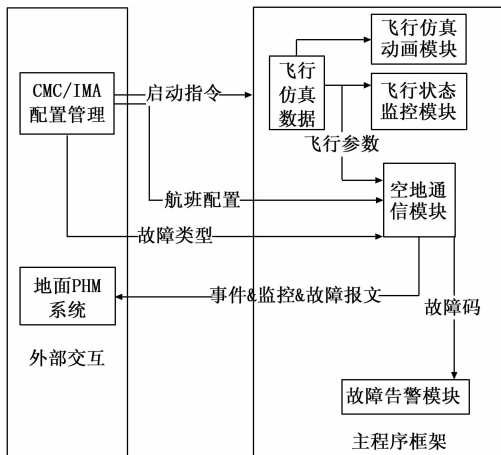


图 2 机载 PHM 系统功能架构图

行信息信息显示主要包括飞机强制显示的参数, 如飞行高度、飞行速度、俯仰角、左右发动机 N1/N2、油温 EGT、油压、日期和时间等。

图 3 以仿真燃油系统的 1# 油箱的相关状态告警为例, 通过不同颜色区分告警信息的危险程度。同时仿真系统实时显示故障码, 并通过故障报 (ACMF) 形式发送到地面 PHM 仿真系统。

2.3 地面 PHM 仿真系统设计

地面 PHM 系统提供与外部系统通信的接口, 并管理各子模块的应用, 其功能架构如图 4 所示。

PHM 地面系统软件与外部交互主要通过数据通信模块实现, 数据通信模块的功能是收发地面系统软件与外界交



图 3 机载仿真系统界面 (燃油系统)

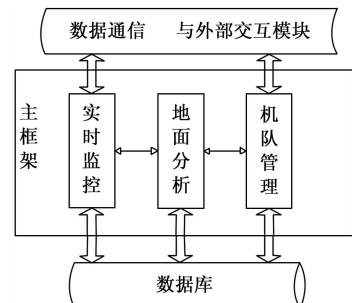


图 4 地面 PHM 系统功能架构图

互的信息, 包括航班信息、飞参数据、故障信息及状态评估信息等。

其中地面分析中与故障分析、维护保障系统相关的定义如表 1 所示。

表 3 传感器主要技术指标

ATA 章节	故障码	故障描述	告警级别	维修保障建议	健康评估	
ATA27 飞控系统	280501	离地速度太小	II	提高地速	中	
	ATA28 燃油系统	280502	燃油压力小	II	检查燃油系统是否有漏油	中
		280503	燃油不足	I	需补充燃油	差
	280504	燃油即将用完	I	紧急迫降或者补充燃油	差	
ATA44 客舱系统	441001	乘客呼叫服务故障	III	故障诊断, 更换故障单元	良	
	441002	乘客阅读灯故障	III	故障诊断, 更换故障单元	良	
	441003	乘务员紧急呼叫故障	III	故障诊断, 更换故障单元	良	
	441004	NS/FSB 信号灯故障	III	故障诊断, 更换故障单元	良	
	440105	音频广播信号转发故障	III	故障诊断, 更换故障单元	良	

地面 PHM 仿真平台完成的功能包括实时监控、地面分析、故障诊断和健康评估等功能，图 5 是地面 PHM 仿真系统接收机载 PHM 各类数据报信息后，进行解析并实时显示，实时监控界面包括实时监测飞机飞行状态、燃油情况、故障信息等。

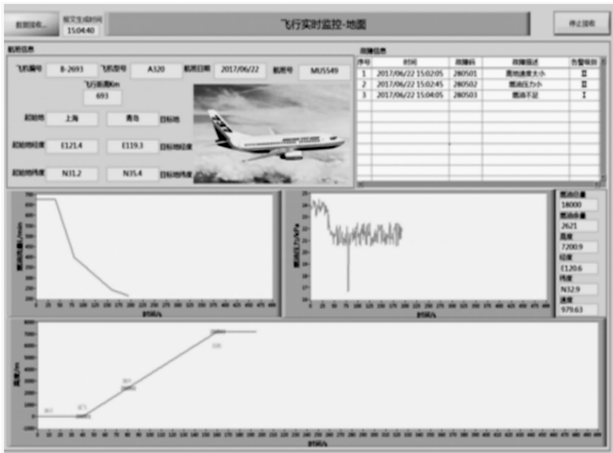


图 5 地面系统实时监视系统界面

3 系统验证设计

仿真验证系统在功能和性能上采用多角度对 PHM 顶层架构的评估，如信号采集、异常监测、故障诊断、故障检测率、隔离率、虚警率等，全面定量、定性对架构进行评估。

3.1 系统验证方法

PHM 架构验证计算机主要包含以下几方面功能：

1) 接收地面数据：从地面监控计算机接收监控数据，包括检测到的飞机运行时的故障和地面分析评估的系统健康度；

2) 统计分析：针对仿真运行数据进行分析，统计注入的故障激励数据在实际运行中的结果，对运行数据进行收集和统计分析，得出故障检测率、隔离率、虚警率等参数；

3) 费效性评价：完成基于统计分析结果和基于 PHM 带来的维修时间、维修成本、机队签派率等参数的分析得出维修时间/成本的减少量、签派率提高带来的运营收益等参数，按照给定的评价算法得出所选架构设计的费效性结果。

图 6 为 PHM 架构评价模块的功能架构图。

验证评价系统接收地面 PHM 发送的数据进行数据统计，计算出仿真系统故障检测率、隔离率、虚警率等参数；基于统计分析结果和基于 PHM 带来的维修时间、维修成本、机队签派率等参数的分析得出维修时间/成本的减少量、签派率提高带来的运营收益等参数，根据评价算法得出所选架构设计的费效性结果。

3.2 费效性评价模块设计

PHM 系统费效性表征实现 PHM 系统故障诊断、预测和状态健康管理能力节省的费用与实现 PHM 系统代价之间

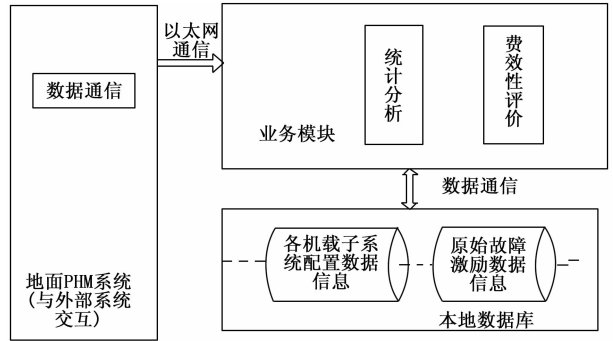


图 6 PHM 架构评价模块的功能架构图

的权衡。其度量模型为：

$$B = \frac{V_{TOTAL} - B_{cost}}{B_{cost}} = \frac{\sum_{i=1}^{FM} TV_i}{B_{cost}} - 1$$

式中， V_{TOTAL} 为 PHM 系统总技术价值，是所欲故障模式技术价值的总和； TV 为针对某一个故障模式，采用 PHM 系统技术的技术价值； FM 为故障模式数； B_{cost} 为 PHM 系统实现代价。

根据任务计算机中 PHM 系统架构的评价算法，开发评价软件模块。通过输入给定 PHM 系统架构的相关数据（加载可靠性、维修性和测试性等参数，如图 7），评价软件可以计算出每个系统的 PHM 费效比。

系统PHM实现代价		系统PHM技术价值评价计算	
飞机机体	A	飞机机体	收发控制器
机电系统	0	机电系统	起落架系统
电气系统	P_c	电气系统
.....	δ	机载电源
航电系统		航电系统	

图 7 费效性分析数据输入

3.3 系统评价结果

系统综合各子系统的费效性，计算飞机级费效性，结合功能完整性，从而得出验证结论（如图 8 所示）。仿真验证平台以客舱子系统 and 燃油子系统为例，建立民航 PHM 顶层架构仿真验证平台，构建若干类型 PHM 顶层架构，从费效性和功能完整性可验证不同架构的优劣。

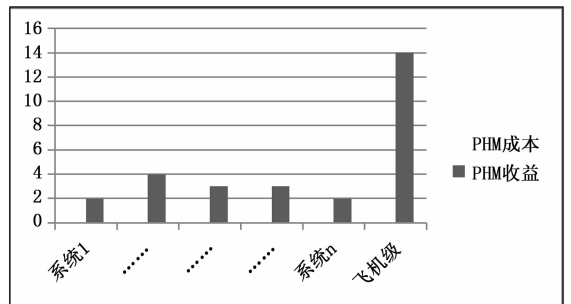


图 8 费效性分析结果